

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

**ГРОБОВЕНКО ЯРОСЛАВ ВІТАЛІЙОВИЧ**



УДК 66.047-912

**ПРОЦЕС СУШІННЯ ТОНКОДИСПЕРСНОЇ ПАСТИ ДІОКСИДУ ТИТАНУ**

**05.17.08 – Процеси та обладнання хімічної технології**

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2019

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано на кафедрі машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** кандидат технічних наук, професор  
**Марчевський Віктор Миколайович,**  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського»,  
професор кафедри машин та апаратів  
хімічних і нафтопереробних виробництв

**Офіційні опоненти** доктор технічних наук, професор  
**Гумницький Ярослав Михайлович,**  
Національний університет «Львівська політехніка»  
Міністерства освіти і науки України,  
професор кафедри екології та збалансованого  
природокористування

доктор технічних наук, старший  
науковий співробітник  
**Петрова Жанна Олександрівна,**  
Інститут технічної теплофізики  
Національної академії наук України,  
головний науковий співробітник відділу  
нестационарного тепломасопереносу  
в процесах сушіння

Захист відбудеться «17» грудня 2019 р. о 14<sup>30</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.05 у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, просп. Перемоги 37, корп. 19, ауд. 201/1.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, просп. Перемоги 37.

Автореферат розісланий «16» листопада 2019 року

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 26.002.05



О.І. Іваненко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Важливою науковою проблемою є зменшення витрат теплової енергії в процесах сушіння, на здійснення яких витрачається до 25 % світового виробництва енергії. Недостатньо вирішеними проблемами є зменшення енергозатрат та інтенсифікація процесу сушіння у виробництві тонкодисперсних порошків, зокрема діоксиду титану ( $\text{TiO}_2$ ). Попит світового ринку на діоксид титану постійно зростає, оскільки великими його споживачами є лакофарбова, металургійна, паперова, фармацевтична та інші галузі промисловості, де  $\text{TiO}_2$  використовується в якості наповнювача. Діоксид титану також використовується як наповнювач для виготовлення різних пластичних мас і виробів та у виробництві високоякісного паперу.

У технології виробництва діоксиду титану найбільш енергоємною і лімітуючою стадією є процес сушіння пасти  $\text{TiO}_2$ . Одним із основних показників готової продукції є низька вологість тонкодисперсного порошку. Вона має бути не більшою ніж 0,3 % залишкової вологи. Для отримання такого значення вологості в звичайних сушильних апаратах збільшують температуру теплоносія на виході із сушарки, що спричиняє значні затрати теплової енергії. Крім того, агломерати матеріалу, що утворюються в процесі сушіння, потребують значних витрат енергії для їхнього розмелювання. У процесі сушіння необхідно руйнувати агломерати матеріалу, витримувати вузький діапазон вологовмісту, здійснювати сепарацію частинок за геометричними розмірами, очищати відпрацьований теплоносій. Також у процесі сушіння необхідно зменшувати витрати теплової енергії на сушіння пасти, збільшувати швидкість сушіння і підвищувати якість та забезпечувати низьку вологість висушеного продукту. Тому дослідження процесу сушіння пасти діоксиду титану та розробка нового високоефективного й енергоощадного обладнання для виробництва тонкодисперсного порошку  $\text{TiO}_2$  із високими заданими механічними та споживчими властивостями є актуальним завданням даного дослідження.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалась відповідно до плану наукової роботи кафедри машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» та ініціативної теми № 04/15 IXФ «Процес сушіння дрібнодисперсної пасти діоксиду титану». Робота відповідає напряму прикладних наукових досліджень КПП ім. Ігоря Сікорського «Створення високоефективних, екологічно чистих, енерго- та ресурсозберігаючих технологій і обладнання у машинобудуванні, хімічній, легкій, нафтопереробній промисловості, промисловості будівельних матеріалів, розробки об'єктно-орієнтовних систем, конструкційно-технологічного моделювання та забезпечення якості й надійності прогресивної техніки».

Дисертаційна робота відповідає переліку пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки на період до 2020 р., затверджених Кабінетом міністрів України (згідно Закону України № 2519-VI від 9.09.2010 р. Про внесення змін до Закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки та Перелік пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних

розробок на період до 2020 року (Додаток до постанови Кабінету Міністрів України № 942 від 7 вересня 2011 р.)»).

**Мета і завдання дослідження.** Метою дослідження є визначення кінетичних закономірностей та основних параметрів процесу сушіння тонкодисперсної пасти  $\text{TiO}_2$ , що необхідні для інтенсифікації процесу та розробки промислового сушильного обладнання.

Відповідно до мети поставлені наступні завдання:

- здійснити аналіз існуючих способів сушіння пастоподібних продуктів та конструкцій сушильних установок;
- сформулювати фізичну модель процесу сушіння пасти  $\text{TiO}_2$  та досушування тонкодисперсного порошку  $\text{TiO}_2$  до високої кінцевої сухості;
- розробити і розв'язати математичну модель процесу сушіння та досушування пасти  $\text{TiO}_2$  для розрахунку промислових сушильних установок;
- спроектувати та виготовити лабораторну сушильну установку, а також розробити методику досліджень процесу сушіння пасти  $\text{TiO}_2$ ;
- виконати експериментальні дослідження процесу сушіння тонкодисперсної пасти діоксиду титану та проаналізувати отримані результати і підтвердити адекватність математичної моделі;
- розробити алгоритм розрахунку промислової сушильної установки для сушіння пасти  $\text{TiO}_2$  і обґрунтувати її економічну ефективність та порівняти отримані результати з аналогами.

*Об'єкт дослідження* – процес сушіння тонкодисперсної пасти діоксиду титану у вихровому сушильному апараті.

*Предмет дослідження* – кінетика процесу сушіння пасти діоксиду титану та параметри процесу, що необхідні для проектування промислових сушильних установок.

**Методи дослідження.** Системні теоретико-експериментальні дослідження, методи фізичного і математичного моделювання процесів тепломасоперенесення, експериментальні статичні і динамічні методи для визначення перепадів тиску газової фази, кінетики процесів подрібнення, сушіння та досушування тонкодисперсних продуктів, інтерполяційні і статистичні методи для обробки та оцінки вірогідності результатів експериментальних досліджень, оптичний метод визначення фракційного складу тонкодисперсних продуктів.

**Наукова новизна отриманих результатів:**

- вперше обґрунтовано та експериментально підтверджено спосіб поєднання сушіння пасти  $\text{TiO}_2$  і досушування тонкодисперсних частинок порошку діоксиду титану в одному сушильному апараті вихрового типу;
- вперше отримано кінетичні закономірності і основні параметри процесу сушіння пасти діоксиду титану, необхідні для проектування промислових сушильних установок;
- теоретично визначено поля швидкостей та тисків вихрових потоків теплоносія;
- експериментально виявлено вплив безперервного подрібнення часток вихрового шару на швидкість сушіння пасти діоксиду титану;

– сформульовано фізичну модель сепарації тонкодисперсних частинок  $\text{TiO}_2$  у вихровому потоці теплоносія, який утворюється в розробленому сушильному апараті.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в тому, що: сформульовано послідовність процесів, які забезпечують високу якість кінцевого продукту – тонкодисперсного порошку діоксиду титану з низьким залишковим вмістом води; встановлено найбільш раціональні параметри здійснення процесу сушіння пасти і досушування тонкодисперсних частинок до залишкової вологості 0,3 %; експериментально отримано значення коефіцієнта подрібнення  $K_z$  агломератів пасти діоксиду титану, що дозволило розрахувати математичну модель процесу сушіння матеріалу  $\text{TiO}_2$ ; визначено конструктивно-технологічні параметри сушильної конусоподібної камери, що забезпечують умови створення вихрових потоків теплоносія і сепарації частинок пасти  $\text{TiO}_2$ ; розроблено методику та складено алгоритм і програму розрахунку промислового сушильного апарату, продуктивністю 500 кг/год по випареній воді, для здійснення процесу сушіння пасти  $\text{TiO}_2$  у вихровому потоці теплоносія; за результатами досліджень розроблено конструкцію промислового сушильного апарату, на яку отримано 4 патенти України на корисну модель; створено дослідну сушильну установку для дослідження кінетики сушіння пастоподібних матеріалів у вихровому потоці теплоносія із безперервним подрібненням висушуваного матеріалу; науково-технічні результати дисертаційної роботи впроваджено в сушильному обладнанні ТОВ «Мілкіленд» і ТОВ «Лакі-Фарма», а також у навчальний процес кафедри машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв інженерно-хімічного факультету КНУ ім. Ігоря Сікорського.

**Особистий внесок здобувача** полягає у тому, що автором самостійно здійснено: аналіз вітчизняних та закордонних джерел літератури щодо процесів сушіння тонкодисперсних паст, зокрема, пасти діоксиду титану  $\text{TiO}_2$  та формулювання науково-технічної проблеми [1, 2, 5, 10–12]; розроблено математичну модель та вибрано методи її розв'язання [2–5, 10, 13]; опрацьовано та проаналізовано результати математичного моделювання та визначено найбільш раціональні режими здійснення процесів сушіння і досушування [2–5, 11]; автором самостійно розроблено сучасну методику виконання експериментальних досліджень, проведено експериментальні дослідження та узагальнено результати експериментів [10, 12, 14]; оброблено та проаналізовано отримані результати досліджень і сформульовано основні положення та висновки дисертації [1, 3, 5, 10]; розроблено рекомендації щодо практичного застосування отриманих результатів досліджень [10–13]; розроблено алгоритм розрахунку сушильної установки та пристроїв для сушіння пасти діоксиду титану [6–9];

Формулювання фізичної та математичної моделей процесу сушіння пасти діоксиду титану, аналіз результатів досліджень здійснено спільно з науковим керівником к. т. н., проф. В. М. Марчевським [3, 5, 10–11].

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати дисертаційної роботи було оприлюднено та обговорено на: VIII, IX та XII Міжнародній науково-практичній конференції студентів, аспірантів і молодих

вчених «Ресурсозберігаючі технології та обладнання» (Київ, 19–20 квітня 2015 року, 24–26 листопада 2015 року, 26–27 квітня 2017 року); 81-й Науково-технічній конференції професорсько-викладацького складу, наукових співробітників і аспірантів (з міжнародною участю) «Хімічна технологія і техніка» (Мінськ, Білорусь, 1–12 лютого 2017 року).

**Публікації.** За результатами дослідження опубліковано 18 наукових праць, у тому числі 5 статей у наукових фахових виданнях України, що індексуються в міжнародних наукометричних базах даних і системах, 4 патенти України на корисну модель, 4 тези доповідей у збірниках матеріалів міжнародних конференцій, 5 статей в інших виданнях.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг дисертації складає 215 сторінок, у тому числі 8 додатків на 53 сторінках. Обсяг основної частини дисертації становить 162 сторінки. Робота містить 78 рисунків і 7 таблиць. Список використаних джерел літератури складається зі 108 найменувань.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** висвітлено стан проблеми інтенсифікації процесу сушіння пасти діоксиду титану, обґрунтовано актуальність теми, визначено зв'язок з науковими програмами, планами, сформульовано мету та завдання роботи, визначено наукову новизну, практичне значення отриманих результатів та особистий внесок автора, зазначено дані щодо апробації основних положень та результатів дослідження.

У **першому розділі** дисертаційної роботи здійснено аналіз сучасних способів сушіння пастоподібних матеріалів та конструкцій сушильного обладнання, у результаті чого визначено доцільність дослідження в цій сфері для створення більш ефективних способів сушіння зі зменшенням енергозатрат та металоємності сушильного устаткування. Обґрунтовано вибір способу сушіння пастоподібних матеріалів та виконано аналіз математичного моделювання тепломасообміну. Розглянуто проблеми реалізації стійких якісних активних гідродинамічних режимів у сушильних апаратах із псевдозрідженим шаром.

Проаналізовано основні вимоги та технічні параметри готового продукту  $\text{TiO}_2$

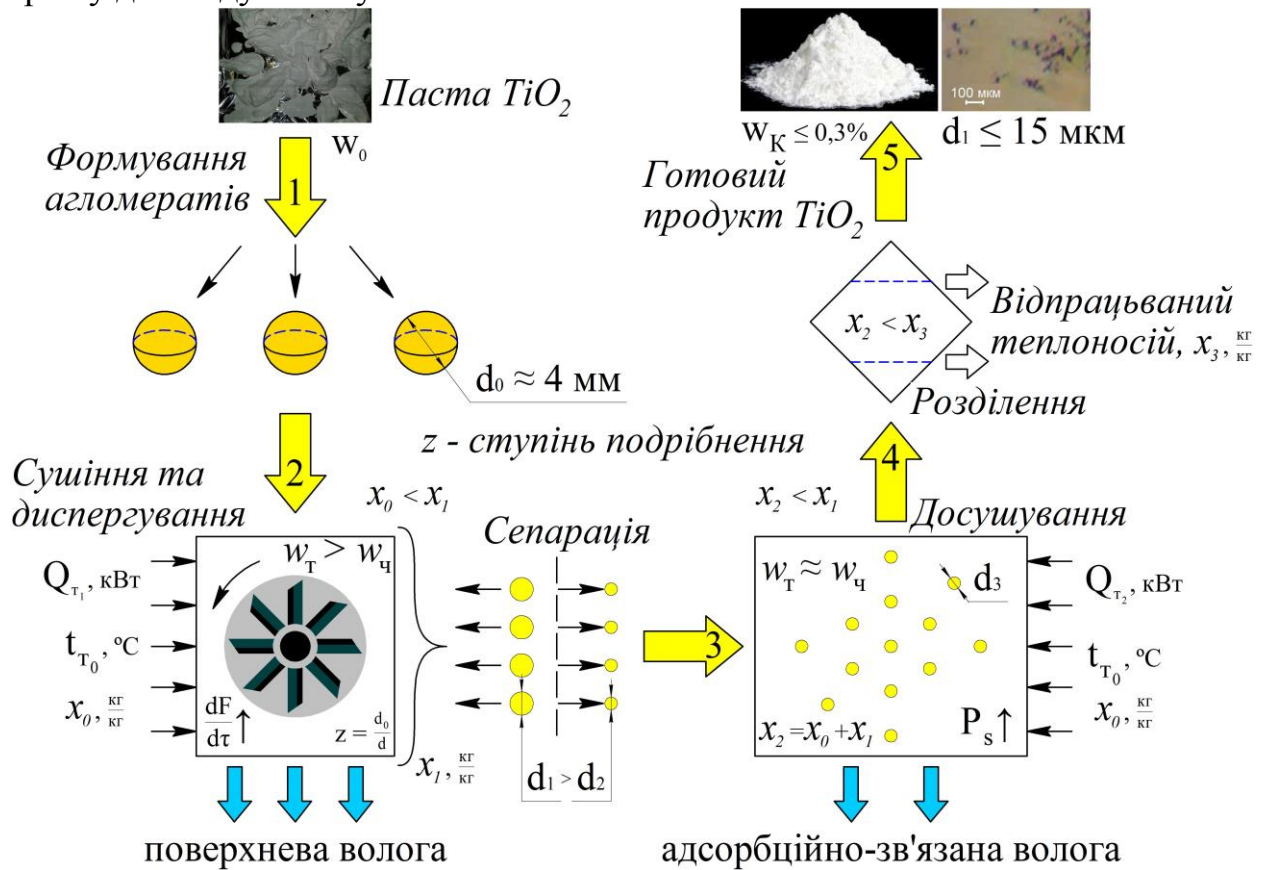
Таблиця 1 – Основні вимоги до готового продукту  $\text{TiO}_2$  згідно ДСТУ 30333:2009

Величина	Значення
Залишкова вологість, %	0,3
Дисперсність, мкм	$\leq 15$
Білизна, ум. од.	97,0

(таблиця 1). Встановлено, що паста діоксиду титану є капілярно-пористим матеріалом, що містить кристали діоксиду титану, з'єднані в тиксотропну пастоподібну масу силами поверхневого натягу води. Визначено, що у пасті  $\text{TiO}_2$  існує поверхнева, капілярна, мікрокапілярна та адсорбційно-зв'язана волога.

У **другому розділі** дисертаційної роботи представлено обґрунтування науково-технічної ідеї (рисунок 1) даної роботи та виконано моделювання і

теоретичне дослідження процесів сушіння та досушування пастоподібного матеріалу діоксиду титану.



$Q_{T1}, Q_{T2}$  – теплові потоки в зону диспергування і досушування відповідно, кВт;  
 $t_{T0}, x_0, x_1, x_2, x_3$  – початкова температура вологовмісту теплоносія;  $dF$  – поверхня розділу фаз;  $W_0, W_K$  – початкова і кінцева вологості  $TiO_2$ ;  $P_s$  – тиск насиченої пари;  
 $w_T, w_ч$  – швидкості теплоносія та частинок матеріалу  $TiO_2$  відповідно

Рисунок 1 – Науково-технічна ідея дисертаційної роботи

Суть науково-технічної ідеї полягає в отриманні тонкодисперсного порошку діоксиду титану із пасти  $TiO_2$  за дотримання технічних вимог державних стандартів до готового продукту (таблиця 1).

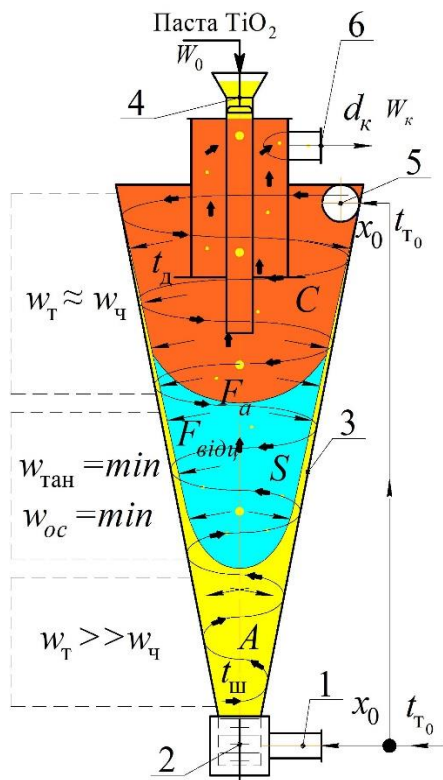
#### Імітаційне моделювання та дослідження гідродинаміки сушильного апарату.

Для визначення полів швидкостей та тисків здійснено імітаційне моделювання гідродинаміки вихрових потоків теплоносія із застосуванням методів 3D-інженерії та автоматизованої системи проектування SOLIDWORKS, а також її модуля Flow Simulation. Моделювання проводилося на запропонованій моделі сушильного апарату, конфігурація якого представлена на рисунку 2.

На основі моделювання сформульовано принципи взаємодії вихрових потоків газового теплоносія та частинок матеріалу  $TiO_2$  в сушильному апараті із псевдозрідженим шаром, які спрямовано на підвищення ефективності процесів сушіння та досушування матеріалу.

Аналіз результатів моделювання засвідчив, що представлена конфігурація сушильного апарату забезпечує реалізацію активного гідродинамічного режиму вихрового потоку теплоносія із частинками матеріалу  $TiO_2$ .





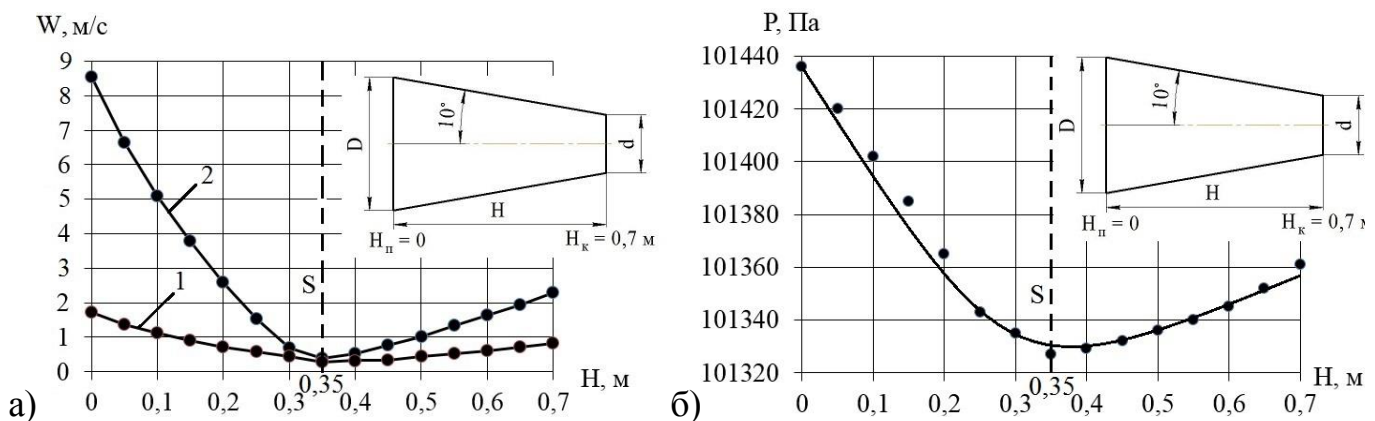
1, 5 – патрубки подачі теплоносія в зони А і С;  
2 – диспергатор;  
3 – сушильна камера;  
4 – живильник;  
6 – патрубок виходу пило-газової суміші;  
Рисунок 2 – Фізична модель процесу

Особливість цього гідродинамічного режиму полягає в тому, що до конічної сушильної камери 3, спорядженої диспергатором ножового типу 2 (у нижній частині), теплоносій вводиться через два патрубки 1 і 5, відповідно у зону диспергування А і, тангенційно, у зону досушування С (у верхній частині сушильної камери).

Встановлено, що вихрові потоки теплоносія характеризуються 2-ма векторами швидкості: вектором осьової швидкості  $\vec{w}_{oc}$ , що має найбільші значення у центрі камери і вектором тангенційної швидкості  $\vec{w}_{тан}$ , найбільші значення якої зосереджено по периферії сушильної камери. Відношення величини тангенційної до осьової швидкості у поперечному перетині сушильної камери визначає ступінь закручення вихрового потоку теплоносія.

Визначено, що максимальні значення тангенційної і осьової швидкостей (рисунок 3) знаходяться у верхній частині сушильної камери, де тангенційно подається потік теплоносія в зону С. У зоні S величини швидкостей зменшуються до мінімальних значень. У нижній частині камери (зона диспергування А) швидкості знову збільшуються, що пояснюється наявністю диспергатора, який ножами закручує вихровий потік теплоносія.

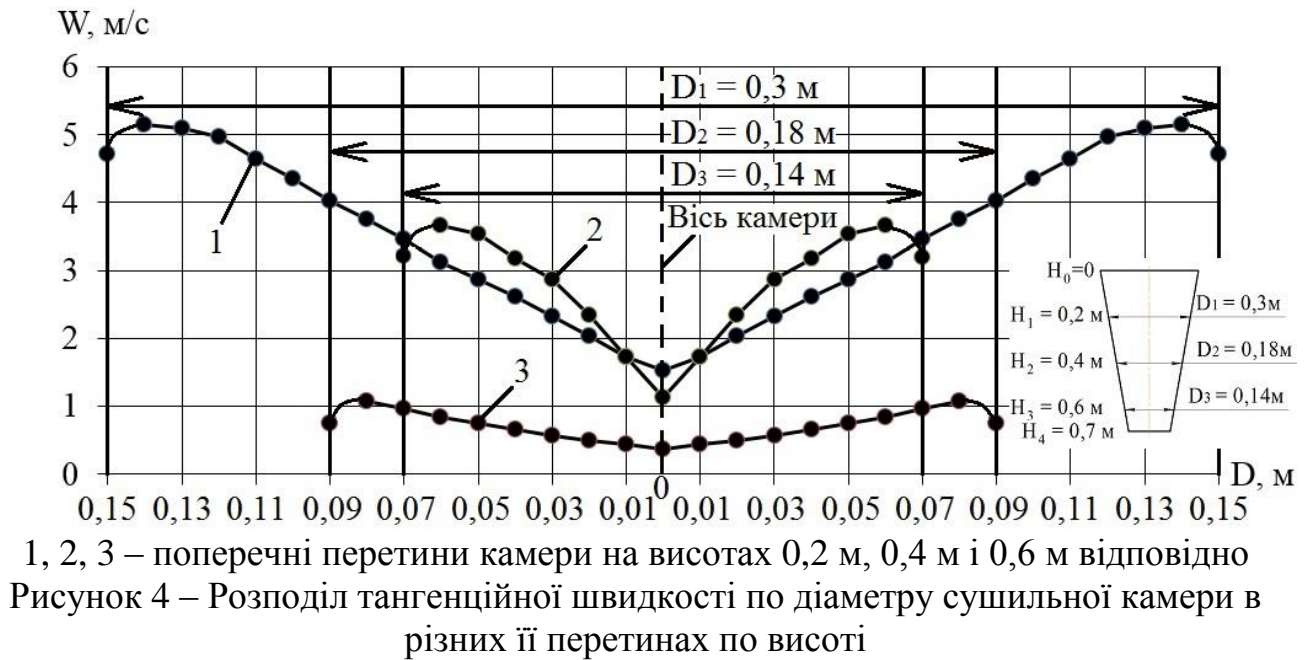
Встановлено, що тиск теплоносія біля стінок по висоті камери змінюється аналогічно зміні тангенційної швидкості верхнього і нижнього вихрових потоків. Основу конусу сушильної камери взято за точку відліку висоти  $H_{п} = 0$ .



1 – осьова швидкість; 2 – тангенційна швидкість; S – зона зустрічі вихрових потоків  
Рисунок 3 – Зміна швидкостей (а) і абсолютного тиску (б) потоків теплоносія по висоті сушильної камери



З'ясовано, що колова швидкість змінюється від найменших значень у центрі сушильної камери до найбільших – біля стінки камери (рисунк 4).



Встановлено, що зміна величини тангенційної швидкості по висоті камери впливає на перепад тиску по висоті сушильної камери в пристінній області, що спричиняє пристінний низхідний потік теплоносія, який транспортує відсепаровані в зоні сепарації агломерати в зону диспергування А.

Визначено, що положення зони зустрічі двох вихрових потоків  $S$  (рисунк 5), закручених в один бік, залежить від швидкостей подачі теплоносія в нижню  $w_1$ , м/с (патрубок 1) та верхню  $w_2$ , м/с (патрубок 5) частини сушильної камери (рисунк 2). Зона  $S$  наближається до тієї частини камери, де витрати теплоносія є меншими.

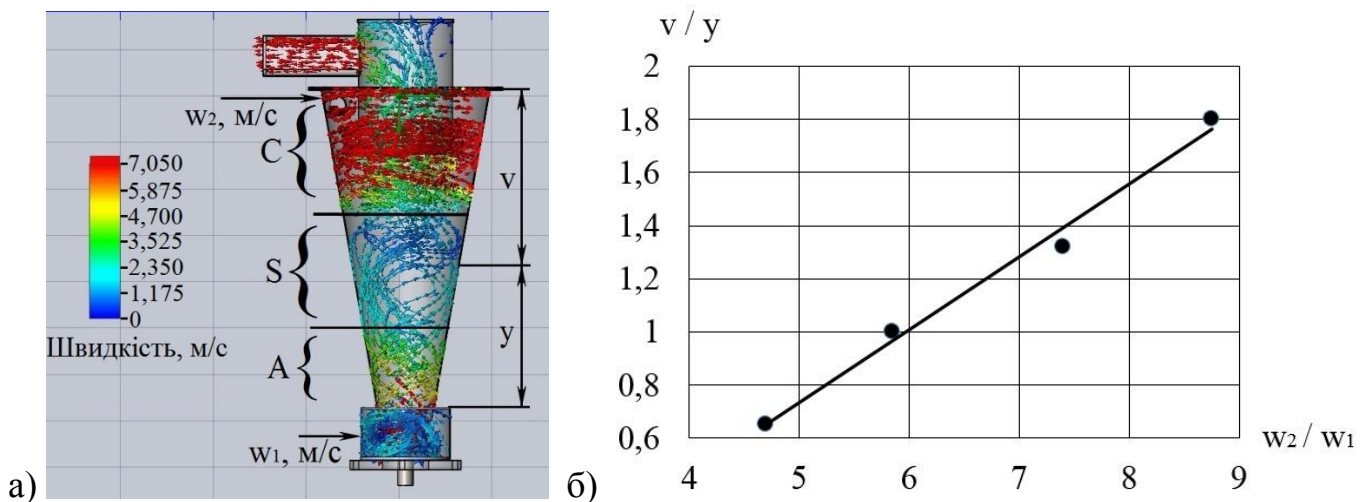


Рисунок 5 – Поля швидкостей вихрового потоку теплоносія (а) та залежність положення зони  $S$  від швидкостей теплоносія на входах 1 і 5 в камеру (б)

Встановлено, що положення зони  $S$  (рисунк 5а) впливає на сепарацію і дисперсний склад висушеного продукту  $\text{TiO}_2$ . Саме в зоні  $S$  два потоки теплоносія

зменшують тангенційну  $w_{\text{тан}}$  і осьову  $w_{\text{ос}}$  швидкості, що сприяє винесенню в зону досушування лише тонкодисперсних частинок  $\text{TiO}_2$ , сила тяжіння яких менша від аеродинамічної сили. Відповідно, агломерати пасти діоксиду титану із силою тяжіння, більшою за аеродинамічну силу, не можуть покинути зону диспергування і перейти в зону досушування.

Фізична модель процесу сушіння пасти діоксиду титану.

Відповідно до положень сформульованої в дисертаційній роботі фізичної моделі процес сушіння тонкодисперсної пасти  $\text{TiO}_2$  включає: формування і подачу агломератів пасти  $\text{TiO}_2$  в зону диспергування  $A$ ; контакт агломератів із вихровим потоком, внаслідок чого поверхня сформованих частинок пасти «припудрюється» порошком пилоподібних частинок  $\text{TiO}_2$ , у результаті чого вони втрачають тиксотропні властивості; сушіння і одночасне безперервне подрібнення в псевдозрідженому вихровому шарі агломератів  $\text{TiO}_2$ ; винесення із псевдозрідженого шару тонкодисперсних частинок і агломератів матеріалу вихровим потоком теплоносія в зону  $S$  та їх сепарацію; досушування відділених тонкодисперсних частинок діоксиду титану в зоні досушування  $C$ ; транспортування висушеного продукту у рукавний фільтр для розділення отриманого продукту і відпрацьованого теплоносія.

У вихровому псевдозрідженому шарі, створеному потоком теплоносія і ножами ротора, у результаті безперервного подрібнення агломератів пасти збільшується волога поверхня частинок  $\text{TiO}_2$ , що контактують із теплоносієм. Таким чином відбувається інтенсивне випаровування поверхневої вологи з вологої поверхні частинок пасти. Процес випаровування відбувається з постійною швидкістю  $\frac{dU}{d\tau} = \text{const}$ , при постійній температурі випаровування вологи із поверхні частинок пасти, що дорівнює температурі мокрого термометра  $t_{\text{м.т.}} = \text{const}$ .

Встановлено, що безперервне подрібнення частинок пасти діоксиду титану подовжує більш інтенсивний перший період сушіння за рахунок зменшення другого періоду. При цьому, випаровування вологи з поверхні частинок пасти діоксиду титану аналогічне випаровуванню з поверхні води.

Визначено, що внутрішній опір масопровідності частинок матеріалу не впливає на інтенсивність процесу сушіння, швидкість якого повністю залежить від швидкості дифузії вологи в зовнішній області. Тобто, коефіцієнт масопередачі в парогазовій фазі дорівнює коефіцієнту масовіддачі  $K = \beta$ , а рівняння масопередачі в парогазовій фазі замінюється рівнянням масовіддачі. При цьому рівноважні параметри відповідають параметрам насиченої пари біля поверхні частинок, що висушуються.

У процесі сушіння випаровується поверхнева вода, що з'єднує й утримує кристали  $\text{TiO}_2$  в межах агломератів пасти. Висушені кристали та окремі вологі агломерати відділяються від висушуваних частинок пасти і виносяться вихровим потоком теплоносія в зону сепарації  $S$ . Під дією відцентрових сил  $\vec{F}_{\text{відц.}}$  недосушені агломерати і крупні частинки переміщуються до стінки конічного корпусу, де пристінним низхідним потоком теплоносія транспортуються назад у псевдозріджений вихровий шар для подальшого подрібнення і висушування.

Кристали і дрібні частинки розміром  $d_1 \leq 12 - 15$  мкм під дією аеродинамічних сил радіального потоку теплоносія виносяться у центральну частину вихрового потоку, де осьовий потік переміщує їх у зону досушування адсорбційно-зв'язаної вологи. У зоні досушування  $S$  осьовий потік теплоносія із тонкодисперсною фракцією кристалів  $\text{TiO}_2$  змішується із закрученим потоком свіжого теплоносія, який надходить у зону досушування через верхній тангенційний ввід апарату з початковою температурою  $t_{T_0}$  і вологовмістом  $x_0$ .

Визначено, що в результаті змішування нижнього і верхнього потоків теплоносія температура в зоні досушування збільшується і, відповідно, збільшується температура дисперсних частинок діоксиду титану, що розподілені в об'ємі теплоносія. Малі розміри частинок і, відповідно, велика їхня парусність забезпечують їм швидкість, що відповідає швидкості теплоносія. Температура частинок зростає, а температура теплоносія зменшується в результаті висушування адсорбційної вологи з поверхні частинок і їх нагрівання.

Висушений до заданої вологості тонкодисперсний порошок діоксиду титану переноситься потоком теплоносія до рукавного фільтру, де відділяється від теплоносія і направляється на наступні технологічні операції.

Математична модель процесу сушіння пасти діоксиду титану в зоні диспергування  $A$ .

Математична модель для зони диспергування описує кінетику сушіння та приріст вологості поверхні контакту фаз внаслідок безперервного диспергування пасти діоксиду титану.

У період прогріву температура пасти  $\text{TiO}_2$  залежить від часу сушіння:

$$\frac{\partial t_m}{\partial \tau} = \frac{\alpha_1 \cdot \partial S(z, \tau_{\Pi}) \cdot (t_{T_0} - t_{m.T.}) - \frac{\partial U_1}{\partial \tau} \cdot r}{G_m \cdot c_m(t_m)}, \quad (1)$$

де  $\alpha_1$  – коефіцієнт тепловіддачі від теплоносія до поверхні частинок у зоні диспергування  $A$ ,  $\text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ ;  $S$  – поверхня контакту фаз в зоні диспергування,  $\text{м}^2$ , що залежить від ступеня подрібнення  $z$  та часу подрібнення  $\tau_{\Pi}$ ;  $t_{T_0}$  – початкова температура теплоносія,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_{m.T.}$  – температура мокрого термометра в зоні диспергування,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\frac{\partial U_1}{\partial \tau}$  – швидкість сушіння у першому періоді,  $1/\text{с}$ ;  $r$  – питома теплота випаровування,  $\text{кДж/кг}$ ;  $G_m$  – одинична кількість пасти  $\text{TiO}_2$ , що відповідає 1 агломерату із  $d_{\text{екв}_0}$ ,  $\text{кг}$ ;  $c_m(t_m)$  – адитивна питома теплоємність матеріалу діоксиду титану,  $\text{кДж/кг} \cdot \text{К}$ ;  $t_m$  – поточна температура матеріалу,  $^{\circ}\text{C}$ . У першому періоді сушіння практично немає зміни температури матеріалу  $\partial t_m / \partial \tau = \text{const}$ .

Приріст вологості поверхні матеріалу  $dS$  визначається ступенем подрібнення  $dz$ :

$$dS = \frac{6 \cdot G_m \cdot dz(\tau_{\Pi})}{\psi \cdot \rho_m \cdot d_{\text{екв}_0}}, \quad \frac{dz}{d\tau} = K_z \cdot z, \quad (2)$$

де  $\psi \leq 1$  – фактор форми агломератів діоксиду титану;  $d_{\text{екв}_0}$  – початковий еквівалентний діаметр частинок  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{м}$ ;  $\rho_m(t_m)$  – адитивна густина матеріалу  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{кг/м}^3$ ;  $K_z$  – коефіцієнт подрібнення,  $1/\text{с}$ .

Рушійною силою перенесення вологи в зовнішній області є різниця тиску насичення водяної пари на поверхні вологих частинок  $P_s$  і парціального тиску водяної пари  $p_T$  у теплоносії. А швидкість сушіння матеріалу  $TiO_2$  в першому періоді визначається:

$$\frac{dW_1}{d\tau} = \beta_p(t_T) \cdot S(z, \tau_n) \cdot (P_s - p_T), \quad \beta_p = \frac{\beta_d}{R_n \cdot t_T}, \quad (3)$$

де  $t_T$  – поточна температура теплоносія, °C;  $\beta_p$  – коефіцієнт масовіддачі, що віднесений до різниці парціальних тисків водяної пари на поверхні частинок матеріалу  $TiO_2$  і в ядрі газової фази,  $\frac{кг}{м^2 \cdot с \cdot Па}$ ;  $\beta_d(t_T)$  – дифузійний коефіцієнт масовіддачі, м/с;  $R_n$  – газова стала водяної пари, Дж/кг·К.

Початкові дані та умови для розв'язання рівнянь 1–3:

$$d_{екв_0} = 4 \text{ мм}, t_{T\tau=0} = t_{T_0}, t_{M\tau=0} = t_{M_0}; G_M = 10^{-4} \text{ кг}; w_0 = 46 \%, \quad (4)$$

де  $t_{M_0} = 18 \text{ °C}$  – початкова температура пасти  $TiO_2$ .

Математична модель процесу досушування тонкодисперсних частинок діоксиду титану в зоні С.

Процес сушіння в зоні досушування С відбувається в другому періоді із швидкістю сушіння, що постійно зменшується.

Визначено, що в зону досушування потрапляють тонкодисперсні частинки діоксиду титану розмірами в межах 12–15 мкм. Фактор форми частинок  $\psi$  становить 0,73, а коефіцієнт форми  $\Phi \approx 6$ . Для тонкодисперсних частинок з еквівалентним розміром  $d_{екв.} < 15 \text{ мкм}$  число  $Bi$  менше 0,1. Це свідчить, що внутрішньо-дифузійний опір перенесення тепла і вологи частинок не лімітує швидкість процесу. У такому процесі перенесення вологи з поверхні частинок матеріалу здійснюється молекулярною дифузією водяної пари в об'єм теплоносія, а перенесення теплоти здійснюється за допомогою теплопровідності  $\lambda_T$ .

При додатковому тангенційному введенні свіжого теплоносія в зону досушування температура тонкодисперсних частинок  $TiO_2$  визначається:

$$\frac{\partial t'_M}{\partial \tau} = \frac{\alpha_2 \cdot S_{дос.} \cdot (t'_{T_0} - t'_M)}{y \cdot \rho_M(t'_M) \cdot c_M(t'_M)} - \frac{\frac{\partial U_2}{\partial \tau} \cdot r}{c_M(t'_M)}, \quad (5)$$

де  $\alpha_2$  – коефіцієнт тепловіддачі від теплоносія до частинок у зоні досушування С, Вт/м<sup>2</sup>·К;  $\frac{\partial U_2}{\partial \tau}$  – швидкість сушіння в другому періоді, 1/с;  $S_{дос.}$  – загальна поверхня тонкодисперсних частинок в зоні досушування, м<sup>2</sup>;  $t'_M$  – поточна температура матеріалу, °C;  $t'_{T_0}$  – початкова середня температура теплоносія в зоні досушування;  $y$  – вміст частинок діоксиду титану у виділеному об'ємі суміші, м<sup>3</sup>.

Температура теплоносія в зоні досушування визначається:

$$\frac{dt'_T}{d\tau} = \frac{\alpha_2 \cdot S_{дос.} \cdot (t'_{T_0} - t'_M)}{l \cdot \rho_T(t'_T) \cdot c_T(t'_T)}, \quad (6)$$

де  $t'_T$  – поточна температура теплоносія, °C;  $\rho_T(t_T)$  – густина теплоносія, кг/м<sup>3</sup>;  $l$  – вміст теплоносія у виділеному об'ємі суміші, м<sup>3</sup>.

Рухийною силою процесу досушування є різниця вологовмістів на поверхні тонкодисперсних частинок  $U_{\text{ч}}$  і в об'ємі теплоносія  $x'_T$ , а масовий потік води визначається (7):

$$\frac{dW_2}{d\tau} = \beta_x(t'_T) \cdot S_{\text{дос.}} \cdot (U_{\text{ч}} - x'_T), \quad \beta_x = \frac{\beta'_d \cdot p'_T}{R_T \cdot t'_T}, \quad (7)$$

де  $\beta_x$  – коефіцієнт масовіддачі, що віднесений до різниці вологовмістів на поверхні тонкодисперсних частинок  $U_{\text{ч}}$  і об'єму теплоносія  $x'_T$  для умов процесу досушування,  $\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$ ;  $\beta'_d$  – дифузійний коефіцієнт масовіддачі в зоні досушування, м/с;  $p'_T$  – парціальний тиск водяної пари у теплоносії, Па;  $R_T$  – універсальна газова стала, Дж/кг·К;  $U_{\text{ч}}$  – поточний вологовміст частинок діоксиду титану;  $x'_T$  – поточний вологовміст теплоносія;  $\rho_T$  – густина теплоносія, кг/м<sup>3</sup>;  $c_T$  – питома теплоємність теплоносія, кДж/кг·К.

Початкові дані та умови для розв'язання рівнянь 5–7:

$$d_{\text{ч}} \leq 15 \text{ мкм}, \quad t'_{T_{\tau=0}} = t'_{T_0}, \quad t'_{M_{\tau=0}} = t'_{M_0}, \quad U_{\text{ч}_0} = U_{1\text{кр}} = 0,3011 \text{ кг/кг}, \quad (8)$$

де  $t'_{M_0}$  – температура матеріалу на вході в зону досушування;  $U_{1\text{кр}}$  отримано при розрахунку математичної моделі.

#### Результати чисельного розв'язання математичної моделі.

Чисельне розв'язання математичної моделі виконано методом Рунге-Кутти. Результатами розрахунку є залежності вологовмісту і температури від часу сушіння пасти діоксиду титану (рисунки 6–9) при густинах теплового потоку 6,3 кВт/м<sup>2</sup> (при температурі теплоносія на вході в сушильну камеру 90 °C) і 8,7 кВт/м<sup>2</sup> (при температурі теплоносія на вході в сушильну камеру 120 °C), що охоплюють період прогріву і період сушіння із постійною швидкістю сушіння  $\frac{dU_1}{d\tau}, \frac{1}{\text{с}}$ .

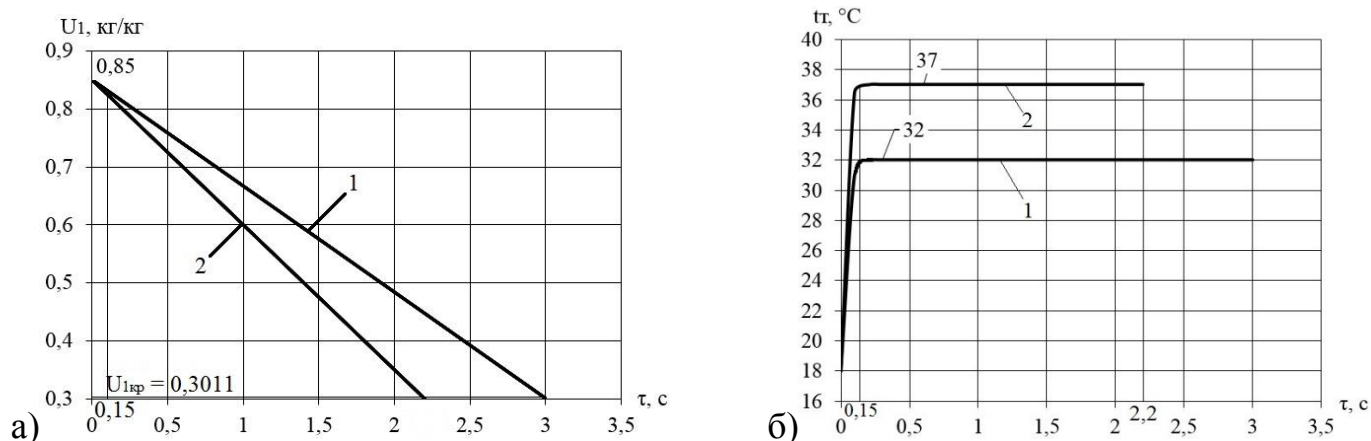
Розв'язок рівнянь 1 і 2 із врахуванням початкових умов 4 представлено зміною залежностей вологовмісту та температури матеріалу діоксиду титану від часу сушіння (рисунок 6) протягом прогріву та першого періоду сушіння.

Тривалість періоду прогріву пасти TiO<sub>2</sub> становить всього 5–6 % від загальної тривалості першого періоду сушіння. За густин теплового потоку 6,3 і 8,7 кВт/м<sup>2</sup> тривалість сушіння пасти TiO<sub>2</sub> від початкового вологовмісту  $U_0 = 0,85 \text{ кг/кг}$  до першого критичного вологовмісту  $U_{1\text{кр}} = 0,3011 \text{ кг/кг}$  становить 3 с та 2,2 с відповідно.

Встановлено, що процес сушіння пасти TiO<sub>2</sub> в першому періоді сушіння лімітується інтенсивністю теплового потоку, підведеного теплоносієм.

Швидкість сушіння  $\frac{dU_1}{d\tau}$  в першому періоді становить 0,183 1/с (при тепловому потоці 6,3 кВт/м<sup>2</sup>) та 0,249 1/с (при тепловому потоці 8,7 кВт/м<sup>2</sup>).

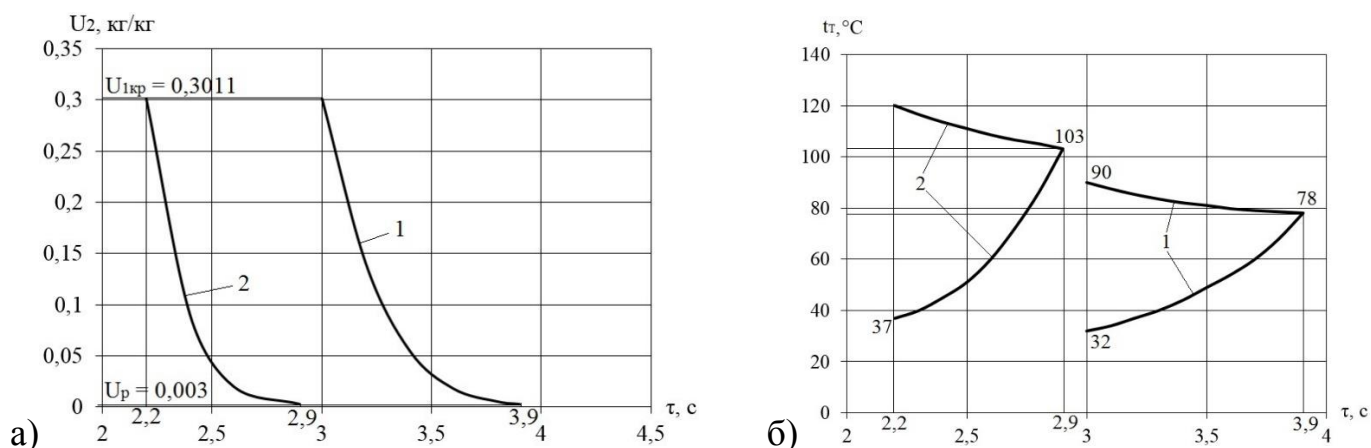
Встановлено, що час сушіння першого періоду буде зменшуватися із збільшенням щільності теплового потоку  $q$ , підведеного теплоносієм.



1 – при тепловому потоці  $q = 6,3$  кВт/м<sup>2</sup>; 2 – при тепловому потоці  $q = 8,7$  кВт/м<sup>2</sup>  
 Рисунок 6 – Залежності зміни теоретичних значень вологовмісту (а) та температури (б) від часу сушіння агломератів пасти діоксиду титану в періоді прогріву та першому періоді сушіння при різних питомих теплових потоках

Сушіння в періоді сталої швидкості сушіння відбувається при температурі мокрого термометра  $t_{м.т.}$ , яка становить 32 °С для теплового потоку 6,3 кВт/м<sup>2</sup> і 37 °С для 8,7 кВт/м<sup>2</sup> відповідно (рис. 6б).

За результатами розв'язку диференціальних рівнянь 5–7 із врахуванням початкових умов 8 для зони досушування тонкодисперсних частинок TiO<sub>2</sub> (рисунок 7) встановлено, що вологовміст матеріалу змінюється від 0,3011 кг/кг до кінцевого 0,003 кг/кг за 0,9 с при тепловому потоці 6,3 кВт/м<sup>2</sup> та 0,7 с при тепловому потоці 8,7 кВт/м<sup>2</sup> відповідно.



1 – при тепловому потоці  $q = 6,3$  кВт/м<sup>2</sup>; 2 – при тепловому потоці  $q = 8,7$  кВт/м<sup>2</sup>  
 Рисунок 7 – Залежності зміни теоретичних значень вологовмісту (а) та температури (б) пасти діоксиду титану від часу сушіння в другому періоді сушіння при різних питомих теплових потоках

Розрахунок здійснювався до заданого кінцевого вологовмісту 0,003 кг/кг, що відповідає залишковій вологості 0,3 % згідно з вимогами до готового продукту TiO<sub>2</sub>.

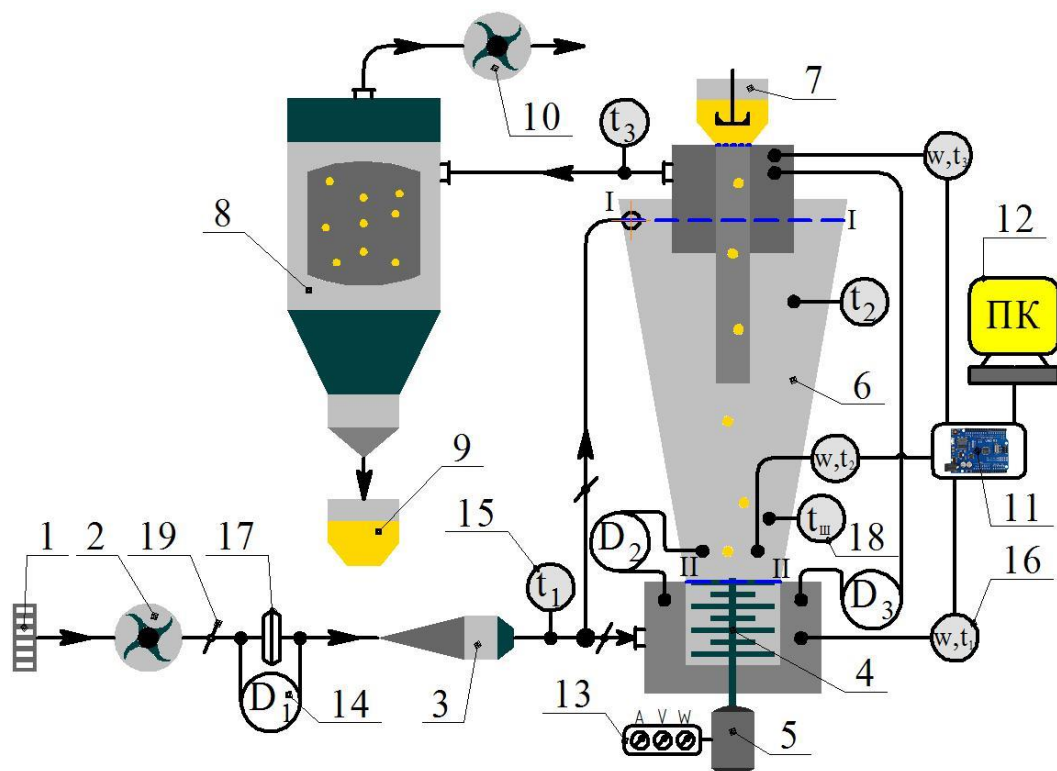
Встановлено, що швидкість досушування тонкодисперсних частинок TiO<sub>2</sub>  $\frac{dU_2}{d\tau}$  зменшується в другому періоді сушіння.

Визначено, що процес досушування частинок лімітується швидкістю дифузії адсорбційно-зв'язаної вологи із поверхні частинок матеріалу в об'єм теплоносія.

У результаті досушування тонкодисперсних частинок  $\text{TiO}_2$  теплоносієм при початковій температурі  $120\text{ }^\circ\text{C}$  і відповідному тепловому потоці  $8,7\text{ кВт/м}^2$  в кінці процесу досушування температури теплоносія і частинок вирівнюються і становлять  $103\text{ }^\circ\text{C}$ . А при початковій температурі теплоносія  $90\text{ }^\circ\text{C}$  і тепловому потоці  $6,3\text{ кВт/м}^2$  рівноважна температура становить  $78\text{ }^\circ\text{C}$ .

Аналіз результатів розрахунку математичної моделі показав, що безперервне подрібнення агломератів пасти діоксиду титану істотно підвищує інтенсивність міжфазного тепломасообміну та зменшує загальний час сушіння.

У **третьому розділі** дисертаційної роботи наведено опис експериментальної установки (рисунок 8), методики проведення досліджень та обробки отриманих експериментальних даних. Експериментальна сушильна установка (рисунок 9) призначена для дослідження гідродинамічних та кінетичних закономірностей процесів сушіння, подрібнення та досушування тонкодисперсної пасти діоксиду титану у вихрових потоках теплоносія.



- 1 – повітряний фільтр; 2 – нагнітаючий вентилятор; 3 – калорифер електричний;  
 4 – диспергатор; 5 – привід диспергатора; 6 – сушильна вихрова камера;  
 7 – живильник-дозатор; 8 – рукавний фільтр; 9 – вивантажувальний бункер;  
 10 – витяжний вентилятор; 11 – мікроконтролер Arduino UNO R3;  
 12 – персональний комп'ютер; 13 – вимірювальний комплекс типу K50 №1654;  
 14 – дифманометри (1–3); 15 – термопари (1–4); 16 – датчики-модулі температури і вологості GY-21 HTU21; 17 – діафрагма; 18 – температурний датчик PT100;  
 19 – шибера регулюючий

Рисунок 8 – Схема експериментальної установки для дослідження кінетики сушіння, подрібнення та досушування тонкодисперсної пасти  $\text{TiO}_2$



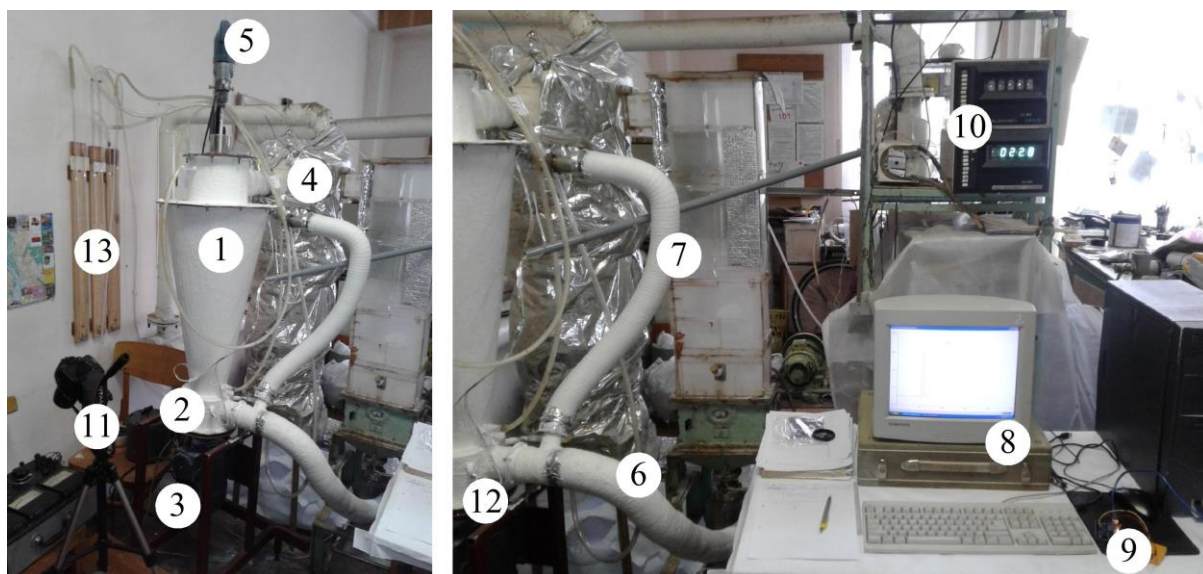
### Параметри лабораторної установки.

Метод сушіння пасту діоксиду титану – конвекційний. У якості теплоносія використовувалося повітря, нагріте до заданої початкової температури. За джерело теплової енергії використано електричний калорифер із номінальною потужністю 15 кВт. Розміри сушильної камери: висота 0,7 м, діаметр в зоні диспергування 0,1 м, діаметр в зоні досушування 0,4 м.

Подача теплоносія здійснювалася за допомогою двох відцентрових вентиляторів, що оберталися з частотою обертання 1640–1890 об/хв за допомогою клинопасової передачі від електродвигунів потужністю 5 кВт. Максимальний тиск нагнітаючого вентилятора досягав 32 кПа, а продуктивність при нагнітанні становила 650–720 м<sup>3</sup>/год.

Дійсна електрична потужність, що витрачалася на подрібнення матеріалу ножами диспергатора, сила струму та напруга на приводі диспергатора вимірювалися вимірювальним комплектом типу К50 №1654 із діапазоном номінальних частот від 45 до 65 Гц.

Головними ріжучими елементами диспергатора були ножі, закріплені на валу обертання електродвигуна. Потужність і частота обертання електроприводу диспергатора становили 3 кВт і 2850 об/хв відповідно.



- 1 – сушильний апарат; 2 – диспергатор; 3 – привід диспергатора;  
 4 – рукавний фільтр; 5 – живильник-дозатор; 6 – загальний підвід теплоносія;  
 7 – підвід теплоносія на досушування; 8 – персональний комп'ютер;  
 9 – мікроконтролер Arduino UNO R3; 10 – блок КВП; 11 – відеокамера; 12 – датчики температури та вологості; 13 – дифманометри

Рисунок 9 – Фото експериментальної сушильної установки

Основні кінетичні параметри процесу сушіння пасту  $\text{TiO}_2$  – вологовміст і температура вихрових потоків теплоносія і дисперсного продукту вимірювалися за допомогою датчика вологи і температури GY-21 HTU21, у якому застосовується мікросхема з інтерфейсом I2C, що забезпечувала точність вимірювання вологості  $\pm 2\%$ , а точність вимірювання температури  $\pm 0,4^\circ\text{C}$ , частота вимірювання 60 Гц.

Для точного вимірювання температури теплоносія і вихрового шару матеріалу застосовувалися платинові терморезистори PT100 із точністю  $\pm 0,4\text{--}0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Перетворення сигналів датчиків у відповідні величини, запис і їхнє збереження на персональному комп'ютері відбувалося за допомогою мікроконтролера Arduino UNO R3 (CH340).

Для відділення відпрацьованого теплоносія і висушеного тонкодисперсного порошку діоксиду титану використовувався рукавний фільтр, всередині якого розміщений металевий каркас, поверх якого натягнуте неткане фільтрувальне синтетичне полотно A20 (EU2), що може затримувати тонкодисперсні частинки до 1 мкм.

#### Експериментальні дослідження гідравлічного опору сушильного апарату.

Відповідно до розробленої методики, експериментально визначено коефіцієнти гідравлічного опору сушильного апарату (рисунок 10) для перетину зони диспергування I-I і тангенційного введення теплоносія в зону досушування II-II (рисунок 8).

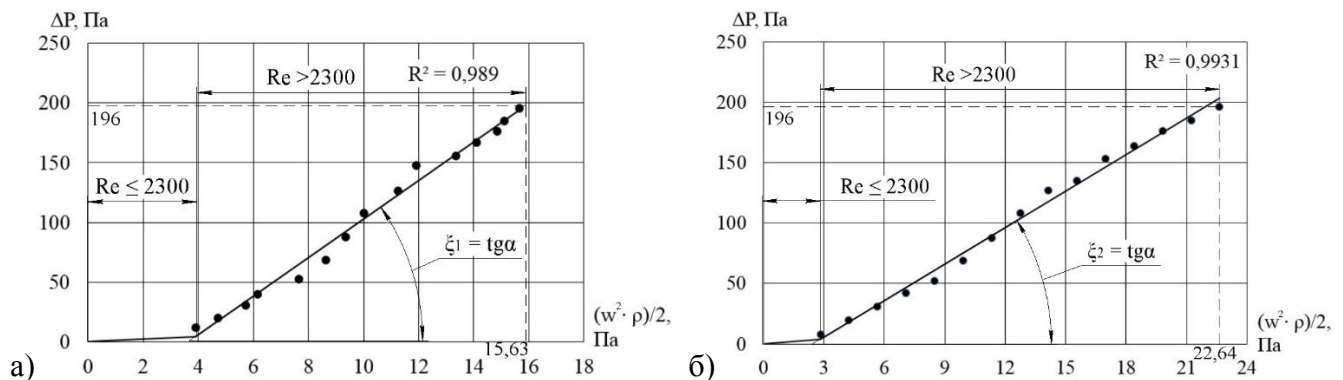


Рисунок 10 – Експериментальні визначення коефіцієнта гідравлічного опору для перетину I-I (а) та для перетину II-II (б) сушильного апарату

Графічні залежності (рис. 10) складаються із зони ламінарної течії теплоносія, де критерій  $Re < 2300$ , та турбулентної, де критерій  $Re > 2300$ . Відповідно, коефіцієнт гідравлічного опору диспергатора апарату для перетину I-I становить  $\xi_1 = \frac{\Delta P}{(w^2 \cdot \rho)/2} = \frac{196}{15,63} = 12,54$ , а для перетину II-II –  $\xi_2 = \frac{\Delta P}{(w^2 \cdot \rho)/2} = \frac{196}{22,64} = 8,66$ .

#### Експериментальні дослідження подрібнення пасти діоксиду титану.

Відповідно до розробленої методики, експериментальним шляхом визначено залежність зміни сили струму та ступеня подрібнення  $z$  від часу подрібнення для зразків матеріалу  $\text{TiO}_2$  (рисунок 11). Паста  $\text{TiO}_2$  надходила для подрібнення із вологовмістом  $U_{1\text{кр}} = 0,3011$  кг/кг.

Встановлено, що сила струму електродвигуна на холостому ходу дорівнює  $I = 3,5$  А, а потужність 80 Вт. Відповідно, визначено, що зразок пасти  $\text{TiO}_2$  масою 0,3 кг повністю подрібнюється за 24 с, а максимальне значення сили струму становить 3,97 А.

Зразок пасти  $\text{TiO}_2$  масою 0,6 кг повністю подрібнюється за 51 с, а максимальне значення сили струму становить 4,68 А. Тоді для зразка масою 1 кг час повного подрібнення становить 87 с, а максимальне значення сили струму становить 5,32 А.

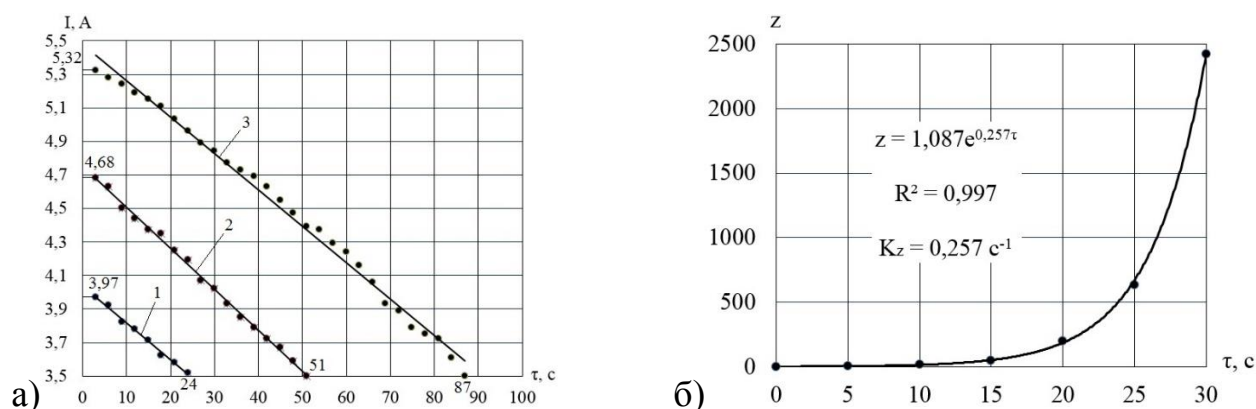


Рисунок 11 – Залежність зміни сили струму та ступеня подрібнення від часу подрібнення: 1 – зразок пасти  $\text{TiO}_2$  масою 0,3 кг; 2 – зразок пасти  $\text{TiO}_2$  масою 0,6 кг; 3 – зразок пасти  $\text{TiO}_2$  масою 1 кг агломератів матеріалу  $\text{TiO}_2$  (а) та залежність зміни ступеня подрібнення від часу подрібнення (б)

Визначено, що залежність енергії, яка витрачається на процес подрібнення, є пропорційною до кількості матеріалу, який подрібнюється (рис. 11а), що дозволило визначити залежність зміни ступеня подрібнення від часу подрібнення та коефіцієнт подрібнення  $K_z = 0,257 \text{ c}^{-1}$ , який залежить від природи матеріалу і використовується для розрахунку ступеня подрібнення  $z$  при величині достовірності апроксимації  $R^2 = 0,997$ . (рис. 11б):

$$\frac{dz}{d\tau} = K_z \cdot z, \quad z = B \cdot e^{K_z \cdot \tau}, \quad z = 1,087 \cdot e^{0,257 \cdot \tau}, \quad (9)$$

де  $B = 1,087$  – константа подрібнення.

Експериментальні дослідження впливу теплового потоку теплоносія на загальний час сушіння пасти діоксиду титану.

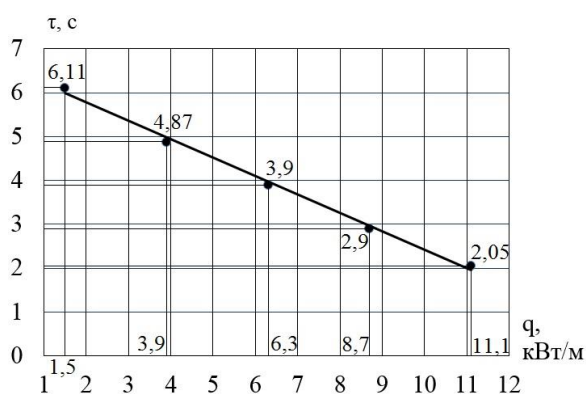


Рисунок 12 – Залежність зміни часу сушіння пасти діоксиду титану від густини теплового потоку теплоносія

Експериментально отримано закономірність зміни часу сушіння пасти діоксиду титану від густини теплового потоку теплоносія (рисунок 12).

Встановлено, що інтенсивність процесу сушіння пасти  $\text{TiO}_2$  збільшується пропорційно зі збільшенням густини теплового потоку від теплоносія, тобто швидкість сушіння лімітується величиною підведеного теплового потоку.

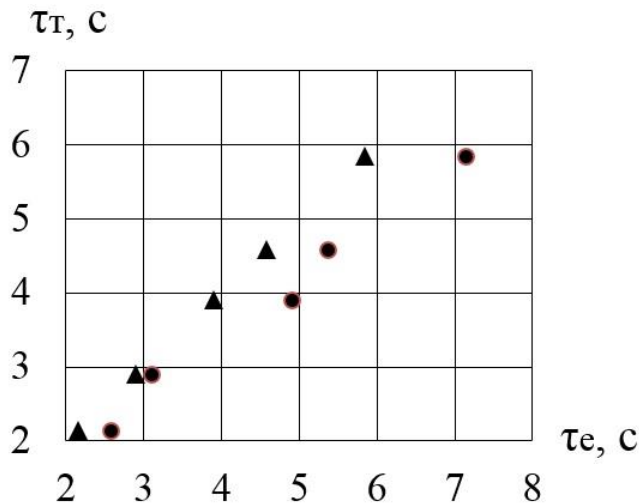
Перевірка адекватності математичної моделі процесу сушіння.

Визначено середньоквадратичне відхилення отриманих теоретичних та експериментальних значень часу сушіння пасти  $\text{TiO}_2$  (рисунок 13).

Ймовірність збігу значень за Фішером:  $\rho_\tau = 84 \%$ .

Середньоквадратичне відхилення:

$$\sigma_{\tau} = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (\tau_i - \tau)^2} \approx 1,2 \text{ c} \quad (10)$$



▲ – теоретичні дані; ● – експериментальні дані

Рисунок 13 – Порівняння теоретичних і експериментальних значень загального часу сушіння пасти діоксиду титану

Максимальне значення середньоквадратичного відхилення загального часу сушіння не перевищує 1,2 с.

Зіставлення теоретичних і експериментальних результатів підтверджує адекватність отриманих закономірностей (ймовірність збігу теоретичних та експериментальних даних за Фішером становить не менше 84 %). Це дає змогу виконувати інженерні розрахунки з достатньою точністю.

Порівняльний аналіз якісних показників продукту.

За допомогою оптичного методу визначення фракційного складу готового продукту отримано розподіл тонкодисперсних частинок  $\text{TiO}_2$  за їх діаметром (рисунок 14).

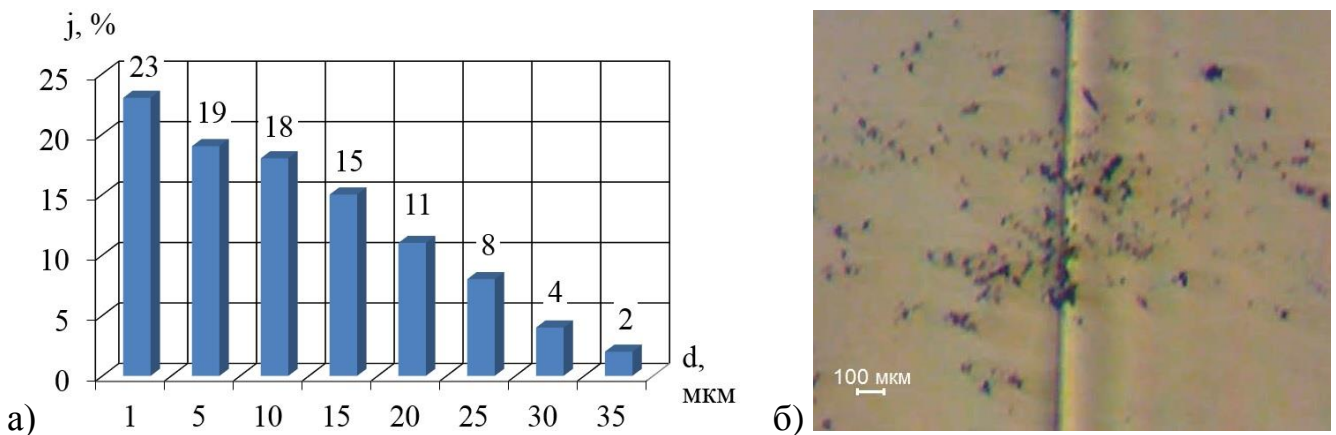


Рисунок 14 – Залежність відношення кількості частинок певного розміру до загальної кількості частинок  $j$  від розміру частинки (а) та вигляд під мікроскопом, тонкодисперсні частинки  $\text{TiO}_2$ , збільшення в 100 разів (б)

Визначено, що 75 % готового продукту відповідає цільовій фракції із дисперсністю частинок  $\leq 15$  мкм. Запропоновано нецільову фракцію (25 %) доподрібнювати в струменевих млинах.

**У четвертому розділі** наведено впровадження результатів експериментальних досліджень процесу сушіння пасти діоксиду титану у конструктивно-технологічні основи моделювання промислового сушильного апарату вихрового типу та визначення його геометричних розмірів, у якому реалізується активний гідродинамічний режим вихрових потоків теплоносія.

Представлено технологічну схему та спосіб отримання тонкодисперсного порошку діоксиду титану із пасти  $\text{TiO}_2$ . На основі математичної моделі складено алгоритм і програму розрахунку промислової сушильної установки продуктивністю 500 кг/год по випареній волозі.

Показано, що основні техніко-економічні показники розробленого сушильного апарата в порівнянні із сучасним аналогами забезпечують зменшення енергозатрат на здійснення процесу сушіння пасти діоксиду титану.

Встановлено, що застосування активного гідродинамічного режиму вихрових потоків теплоносія у комплексі з безперервним диспергуванням агломератів матеріалу дозволяє значно підвищити ефективність процесів тепломасообміну при зневодненні пастоподібних матеріалів.

## ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота спрямована на вирішення важливого науково-технічного завдання – підвищення ефективності процесу сушіння тонкодисперсної пасти діоксиду титану у вихровому потоці теплоносія із застосуванням псевдозрідження та безперервного подрібнення матеріалу.

1. Обґрунтовано та експериментально підтверджено спосіб поєднання процесів сушіння і подрібнення пасти  $\text{TiO}_2$  та досушування тонкодисперсних частинок діоксиду титану в одному сушильному апараті вихрового типу.

2. Науково обґрунтовано фізичну і розвинено математичну моделі процесів сушіння та досушування тонкодисперсної пасти діоксиду титану у вихрових потоках теплоносія.

3. Отримано кінетичні закономірності та основні параметри процесу сушіння пасти діоксиду титану, необхідні для проектування промислових сушильних установок.

4. Теоретично визначено поля тангенційних і осьових швидкостей та тисків вихрових потоків теплоносія.

5. Експериментально визначено вплив безперервного подрібнення частинок матеріалу у псевдозрідженому шарі на швидкість сушіння пасти діоксиду титану.

6. Сформульовано фізичну модель сепарації тонкодисперсних частинок  $\text{TiO}_2$  у вихровому потоці теплоносія, що утворюється в розробленому сушильному апараті.

7. Встановлено найбільш раціональні параметри здійснення процесу сушіння пасти і досушування тонкодисперсних частинок матеріалу до залишкової вологості 0,3 %.



8. Експериментально отримано значення коефіцієнта швидкості подрібнення агломератів пасти діоксиду титану  $K_z$  та коефіцієнтів гідравлічного опору диспергатора  $\xi_1$  і тангенційного вводу теплоносія в зону досушування  $\xi_2$ , що дозволило розрахувати математичну модель процесу сушіння пасти діоксиду титану.

9. Визначено конструктивно-технологічні параметри сушильної конусоподібної камери, що забезпечують умови створення вихрових потоків теплоносія і сепарації частинок матеріалу  $TiO_2$ .

10. На основі результатів експериментальних досліджень підтверджено адекватність математичної моделі процесів сушіння та досушування пасти діоксиду титану.

11. За результатами дослідження розроблено методику та складено алгоритм і програму розрахунку промислового сушильного апарату, продуктивністю 500 кг/год по випареній волозі, для здійснення сушіння пасти  $TiO_2$  у вихровому потоці теплоносія.

12. Науково-технічні результати дисертаційної роботи впроваджено в сушильному обладнанні ТОВ «Мілкіленд» і ТОВ «Лакі-Фарма», а також у навчальний процес кафедри машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв інженерно-хімічного факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ АВТОРОМ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### *Статті у наукових фахових виданнях:*

1. Марчевський В. М. Аеродинаміка вихрових потоків сушильного агенту в сушильній камері / В. М. Марчевський, **Я. В. Гробовенко** // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – 2018. – № 1 (81). – С. 38–42. (Index Copernicus, DOAJ). *Особистий внесок здобувача: обґрунтування умов реалізації вихрового шару частинок пасти  $TiO_2$  та визначення коефіцієнтів гідравлічного опору сушильної камери і диспергатора, проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз результатів експериментів.*

2. Marchevskii V. Kinetics of drying the titanium dioxide paste in the vortex dryer / V. Marchevskii, **Y. Grobovenko**, V. Telestakova // Ukrainian Food Journal. – 2018. – Volume 7. – Issue 2. – PP. 311–323. (Web of Science, Index Copernicus, EBSCO, Ulrichs Web, Global Impact Factor, Cabi Full Text, OLUSD, DRJI, Universal Impact Factor, ROAD, ERIH PLUS, DOAJ, Info Base Index, CASSI). *Особистий внесок здобувача: обґрунтування та розв'язання математичної моделі процесу, проведення експериментальних досліджень, обробка та узагальнення одержаних результатів.*

3. Marchevskii V. Product grinding influence on the drying process of dispersed titanium dioxide paste / V. Marchevskii, **Y. Grobovenko** // Ukrainian Journal of Food Science. – 2018. – Volume 6. – Issue 1. – PP. 188–198. (Index Copernicus, EBSCO, Ulrichs Web, Global Impact Factor, Cabi Full Text, OLUSD, DRJI, Universal Impact Factor, ROAD, ERIH PLUS, DOAJ, Info Base Index, CASSI). *Особистий внесок здобувача: теоретичні дослідження процесів подрібнення, сушіння та досушування тонкодисперсної пасти*

діоксиду титану, проведення експериментальних досліджень, обробка та узагальнення одержаних результатів.

4. Марчевський В. М. Задача ефективного управління процесом отримання тонкодисперсного порошку діоксиду титану в ході вихрової сушки / Марчевський В. М., Гробовенко Я. В. // Автоматизація технологічних і бізнес процесів. – 2018. – Том 10. – № 3. – С. 49–56. (IndexCopernicus, EBSCO, UlrichsWeb, Cabi, ROAD, CrossRef, ResearchBib). *Особистий внесок здобувача: аналіз конструкцій сушильних апаратів та диспергаторів, робота над апаратним забезпеченням, проведення експериментальних досліджень процесів сушіння пасту діоксиду титану та досушування тонкодисперсного порошку  $TiO_2$ , визначення та аналіз кінетичних закономірностей вологовмісту і температури продукту від часу сушіння.*

5. Marchevskii V. Probation results of the original swirling drying apparatus for paste products / V. Marchevskii, Y. Grobovenko // Mechanics and Advanced Technologies. – 2018. – Vol. 2. – No. 83. – PP. 100–107. (Index Copernicus, PИЦ, Open Academic Journals Index (OAJI), Cite Factor, DAOJ, World Cat, BASE, EBSCO). *Особистий внесок здобувача: теоретичний аналіз процесів сушіння кристалоподібних тонкодисперсних продуктів, розробка і виготовлення дослідного сушильного апарату та проведення досліджень кінетики сушіння пасту діоксиду титану.*

#### **Патенти на корисні моделі:**

6. Патент № 107088 Україна МПК F26B 3/084 (2006.01) Сушильна установка із псевдозрідженим шаром інертних тіл та живильником / Марчевський В. М., Гробовенко Я. В.; Заявл. 19.10.2015; Опубл. 25.05.2016, Бюл. № 10. *Особистий внесок здобувача: обґрунтування технологічних параметрів конструкцій сушильної камери та живильника-дозатора і визначення технічних параметрів, що необхідні для проектування сушильної установки.*

7. Патент № 107089 Україна МПК F26B 17/10 (2006.01) Спосіб для сушіння пастоподібних матеріалів / Марчевський В. М., Гробовенко Я. В.; Заявл. 19.10.2015; Опубл. 25.05.2016, Бюл. № 10. *Особистий внесок здобувача: проведення патентного пошуку, обґрунтування технології способу сушіння пастоподібних матеріалів, аналіз гідродинаміки вихрових потоків теплоносія.*

8. Патент № 108688 Україна МПК F26B 17/10 (2006.01) Апарат для сушіння пастоподібних матеріалів / Марчевський В. М., Гробовенко Я. В.; Заявл. 09.02.2016; Опубл. 25.07.2016, Бюл. № 14. *Особистий внесок здобувача: обґрунтування конструкції сушильних шахт апарату, розрахунок енергозатрат установки на проведення процесу сушіння паст і порівняння отриманих параметрів із аналогами.*

9. Патент № 131110 Україна МПК F26B 17/10 (2006.01) Апарат для сушіння пастоподібних продуктів / Марчевський В. М., Гробовенко Я. В., Візерський Д. С.; Заявл. 07.06.2018; Опубл. 10.01.2019, Бюл. № 1. *Особистий внесок здобувача: обґрунтування конструкції сушильної камери апарату, розрахунок енергозатрат установки на проведення процесу сушіння паст і порівняння отриманих параметрів із аналогами.*

#### **Статті в інших виданнях:**

10. Marchevskii V. M. Simulation of drying fine particles  $TiO_2$  in a stream of drying agent / V. M. Marchevskii, Y. V. Grobovenko, D. S. Vizerskyi / Scientific-discussion. – 2017. – № 3. – С. 21–24. (Research Bib, SIS, DIIF). *Особистий внесок здобувача: теоретичне моделювання гідродинаміки вихрових потоків теплоносія в сушильній камері за допомогою системи SolidWorks, обґрунтування фізичної та математичної моделей*



сушіння пасти діоксиду титану та проведення експериментальних досліджень на оригінальній сушильній установці.

11. Марчевський В. М. Процес сушіння діоксиду титану / В. М. Марчевський, **Я. В. Гробовенко** // International Scientific Journal. – 2016. – № 5. – С. 22–24. (Cross Ref, РИНЦ, ОАІ, Research Bib, JIF, BASE, Journal Factor, Cosmos Impact Factor, Open J-Gate, Cite Factor, I2OR, RePEc). *Особистий внесок здобувача: аналіз існуючих способів і установок для сушіння тонкодисперсних паст, вибір сушильного обладнання для проведення процесу сушіння пасти діоксиду титану і досушування тонкодисперсного порошку  $TiO_2$ , удосконалення фізичної моделі та розв'язання математичної моделі процесів сушіння та досушування, аналіз отриманих результатів.*

12. Марчевський В. М. Процес сушіння пасти діоксиду титану у вихровому сушильному апараті / В. М. Марчевський, **Я. В. Гробовенко** // Наукове товариство Smart and Young. – 2016. – Випуск № 11–12. – С. 55–57. (Quality Factor, Index Copernicus, Научная электронная библиотека). *Особистий внесок здобувача: обґрунтування гідродинаміки вихрового потоку сушильного агента в сушильній камері, знаходження розміщення зон диспергування, сепарування та досушування продукту в сушильній камері шляхом імітаційного моделювання в системі SolidWorks, проектування конструкції сушильного апарату та живильника-дозатора.*

13. Марчевський В. М. Моделювання процесу сушіння тонкодисперсних часток  $TiO_2$  в потоці сушильного агента / В. М. Марчевський, **Я. В. Гробовенко** // Вісник КПІ ім. Ігоря Сікорського. Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. – 2016. – № 1. – С. 25–27. *Особистий внесок здобувача: проведення математичного моделювання процесу досушування тонкодисперсної пасти  $TiO_2$ , аналіз отриманих кінетичних закономірностей та проведення експериментальних досліджень процесу досушування в оригінальному сушильному апараті.*

14. Марчевський В. М. Гідродинаміка вихрового сушильного апарату для пастоподібних продуктів / В. М. Марчевський, **Я. В. Гробовенко** // Наука онлайн: Міжнародний електронний науковий журнал – 2018. – № 6. (Cross Ref, РИНЦ, ОАІ, Research Bib, JIF, BASE, Journal Factor, Cosmos Impact Factor, Open J-Gate, Cite Factor, I2OR, RePEc). *Особистий внесок здобувача: дослідження гідродинаміки вихрових потоків теплоносія та експериментальне визначення коефіцієнтів гідравлічного опору диспергатора та каналу сушильної камери апарату.*

#### **Тези доповідей в збірках матеріалів конференцій:**

15. Марчевський В. М. Сушильна установка з псевдозрідженим шаром інертних тіл та живильником / В. М. Марчевський, **Я. В. Гробовенко** // Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання: VIII міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих вчених, 19–20 квітня 2015 р. : збірник тез доповідей. – Київ, 2015. – С. 95–96. *Особистий внесок здобувача: фізичне та математичне моделювання процесу сушіння та обґрунтування конструкції сушильної установки і диспергатора.*

16. Марчевський В. М. Апарат для сушіння пастоподібних матеріалів у вихровому шарі / В. М. Марчевський, **Я. В. Гробовенко** // Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання: IX міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих вчених, 24–26 листопада 2015 р. : збірник тез доповідей. – Київ, 2015. – С. 80–81. *Особистий внесок здобувача: проведення аналізу існуючих способів сушіння паст і конструкцій сушильних апаратів, обґрунтування конструкції апарату та аналіз основних технологічних параметрів процесу сушіння.*

17. Марчевський В. М. Залежність конфігурації потоків в корпусі сушильної установки від напрямку подачі теплоносія / В. М. Марчевський, **Я. В. Гробовенко**, Д. С. Візерський // Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання: XII міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих вчених, 26–27 квітня 2017 р.: збірник тез доповідей. – Київ, 2017. – С. 64–65. *Особистий внесок здобувача: моделювання гідродинаміки вихрового руху сушильного агента в сушильній камері, знаходження розміщення зони сепарації тонкодисперсних частинок  $TiO_2$ , визначення швидкісних режимів вихрових потоків теплоносія на сушіння та досушування продукту.*

18. Марчевський В. М. Процес сушіння пасти діоксиду титану у вихровому сушильному апараті / В. М. Марчевський, **Я. В. Гробовенко** // Хімічна технологія і техніка: 81 міжнародна науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу, наукових співробітників і аспірантів, 1–12 лютого 2017 р.: збірник тез доповідей. – Мінськ, Білорусь, 2017. – С. 137–138. *Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень кінетики процесу сушіння пасти діоксиду титану.*

## АНОТАЦІЯ

**Гробовенко Я. В. Процес сушіння тонкодисперсної пасти діоксиду титану.** – На правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», МОН України, Київ, 2019.

Дисертаційна робота спрямована на вирішення важливого науково-технічного завдання – підвищення ефективності процесу сушіння тонкодисперсної пасти діоксиду титану у вихровому потоці теплоносія із застосуванням псевдозрідження та безперервного подрібнення матеріалу.

Теоретично обґрунтовано та експериментально доведено, що застосування активного гідродинамічного режиму вихрових потоків теплоносія в поєднанні із безперервним подрібненням матеріалу суттєво підвищує інтенсивність тепломасообмінних процесів при збереженні якості висушеного продукту діоксиду титану.

Обґрунтовано та експериментально підтверджено спосіб поєднання процесів сушіння і подрібнення пасти  $TiO_2$  та досушування тонкодисперсних частинок діоксиду титану в одному сушильному апараті вихрового типу. Отримано кінетичні закономірності та основні параметри процесу сушіння пасти діоксиду титану, необхідні для проектування промислових сушильних установок. Визначено конструктивно-технологічні параметри сушильної конусоподібної камери, що забезпечують умови утворення вихрових потоків теплоносія і сепарації частинок матеріалу  $TiO_2$ . Сформульовано фізичну модель сепарації тонкодисперсних частинок  $TiO_2$  у вихровому потоці теплоносія, що утворюється в розробленому сушильному апараті. Запропоновано методику розрахунку промислового сушильного апарату вихрового типу.

**Ключові слова:** сушіння, псевдозрідження, діоксид титану, подрібнення, вихрові потоки, теплоносій, вологовміст.

## АННОТАЦИЯ

**Гробовенко Я. В. Процесс сушки тонкодисперсной пасты диоксида титана.** – На правах рукописи. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.17.08 – процессы и оборудование химической технологии. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», МОН Украины, Киев, 2019.

Диссертационная работа направлена на решение важной научно-технической задачи – повышение эффективности процесса сушки тонкодисперсной пасты диоксида титана в вихревом потоке теплоносителя с применением псевдоожижения и непрерывного измельчения материала.

Теоретически обосновано и экспериментально доказано, что применение активного гидродинамического режима вихревых потоков теплоносителя в сочетании с непрерывным измельчением материала существенно повышает интенсивность теплообменных процессов при сохранении качества готового продукта диоксида титана.

Обосновано и экспериментально подтверждено способ сочетания процессов сушки и измельчения пасты  $\text{TiO}_2$  и досушивания тонкодисперсных частиц диоксида титана в одном сушильном аппарате вихревого типа. Получены кинетические закономерности и основные параметры процесса сушки пасты диоксида титана, необходимые для проектирования промышленных сушильных установок. Определены конструктивно-технологические параметры сушильной конусообразной камеры, обеспечивающие условия создания вихревых потоков теплоносителя и сепарации частиц материала  $\text{TiO}_2$ . Сформулирована физическую модель сепарации тонкодисперсных частиц  $\text{TiO}_2$  в вихревом потоке теплоносителя, образующегося в разработанном сушильном аппарате. Предложена методика расчета промышленного сушильного аппарата вихревого типа.

**Ключевые слова:** сушка, псевдоожижение, диоксид титана, измельчение, вихревые потоки, теплоноситель, влагосодержание.

## ABSTRACT

**Grobovenko Y. The process of drying a fine paste of titanium dioxide.** – Manuscript. Dissertation for the degree of candidate of technical sciences (for the Ph. D.), specialty 05.17.08 – processes and equipment of chemical technology. – National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» – National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, 2019.

The dissertation is aimed at solving an important scientific and technical task – increasing the efficiency of the process of drying a fine paste of titanium dioxide in the vortex flow of coolant with the use of fluidization and continuous grinding of the material.

It is theoretically substantiated and experimentally proved that the use of active hydrodynamic mode of vortex flows of the coolant in combination with continuous grinding of the material significantly increases the intensity of heat and mass transfer processes while maintaining the stable kinetics of the process of drying the dioxide paste.

The method of combining the processes of drying and grinding of  $\text{TiO}_2$  paste and drying of fine particles of titanium dioxide in one vortex type drying apparatus has been substantiated and experimentally confirmed. It is established that the vortex flows of the coolant are characterized by 2 velocity vectors: the axial velocity vector, which has the largest values in the center of the chamber and the vector of the tangential velocity, the largest values of which are concentrated around the periphery of the drying chamber. The ratio of the tangential velocity to the axial velocity in the cross section of the drying chamber determines the degree of swirling of the vortex flow of the coolant.

The physical and mathematical models of the processes of drying and drying of the fine paste of titanium dioxide in the vortex flows of the coolant are scientifically substantiated. It is determined that the internal resistance of the mass conductivity of the particles of the material does not affect the intensity of the drying process, the speed of which depends entirely on the rate of diffusion of moisture in the outer region. That is, the mass transfer coefficient in the gas and gas phase is equal to the mass transfer coefficient  $K = \beta$ , and the mass transfer equation in the gas and gas phase is replaced by the mass transfer equation. In this case, the equilibrium parameters correspond to the parameters of the saturated vapor near the surface of the dried particles. The kinetic regularities and basic parameters of the process of drying of titanium dioxide paste necessary for the design of industrial drying plants were obtained. The effect of continuous grinding of particles of material in the fluidized bed on the drying rate of titanium dioxide paste was experimentally determined. The fields of tangential and axial velocities and vortex pressures of the coolant are theoretically determined. The physical model of separation of fine  $\text{TiO}_2$  particles in the vortex flow of the coolant formed in the developed drying apparatus is formulated. The most rational parameters of the process of drying the paste and drying of fine particles of the material to a residual moisture content of 0,3 % were determined.

During the drying process, surface water evaporates, which connects and holds  $\text{TiO}_2$  crystals within the paste agglomerates. The dried crystals and the individual wet agglomerates are separated from the dried particles of the paste and carried by the vortex flow of the coolant to the separation zone. Under the action of centrifugal forces back to the fluidized vortex layer for further grinding and drying.

The values of the coefficient of grinding of the titanium paste agglomerates  $K_z$  and the coefficients of the hydraulic resistance of the dispersant  $\xi_1$  and the tangential input of the coolant into the drying zone  $\xi_2$  were obtained experimentally, which made it possible to calculate a mathematical model of the process of drying the titanium dioxide paste. The design and technological parameters of the drying cone chamber, which provide the conditions for the creation of vortex flows of the fluid and the separation of particles of material  $\text{TiO}_2$ .

According to the results of the study, a methodology was developed and an algorithm and program for the calculation of an industrial drying apparatus, with a capacity of 500 kg/h on evaporated moisture, were developed for drying  $\text{TiO}_2$  paste in the vortex flow of a coolant.

**Keywords:** drying, fluidization, titanium dioxide, grinding, vortex flows, coolant, moisture content.